

# 磁约束核聚变托卡马克等离子体 与壁相互作用研究进展

吕广宏<sup>1</sup>, 罗广南<sup>2</sup>, 李建刚<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

(2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)



吕广宏

中图分类号: O4-1

文献标识码: A

文章编号: 1674-3962(2010)07-0042-07

**摘要:** 核聚变是潜在的清洁安全能源, 其最终的实现对中国能源问题的解决尤其重要。磁约束托卡马克是目前最有可能实现受控热核聚变的方法。磁约束聚变能的实现面临两大瓶颈问题: 高参数稳态等离子体物理问题和托卡马克装置及未来反应堆关键材料问题。其中关键材料问题的解决在很大程度上取决于我们对等离子体与壁材料相互作用(Plasma-Wall Interactions, PWI)过程和机理的深入理解。PWI现象主要发生在托卡马克磁最外封闭磁面以外的边界等离子体(又称为刮削层, Scrapped-Off Layer, SOL)和直接接触 SOL 的面对等离子体材料(Plasma-Facing Materials, PFM)区域内。因此, PWI问题直接决定了聚变的装置运行安全性、壁材料部件研发进程和未来壁的使用寿命。弄清 PWI 的各种物理过程和机理并施以有效的控制, 是未来核聚变能实现的重要环节之一。对 PWI 国内外研究现状进行了详细的总结评述, 并阐述了 PWI 的未来发展趋势和亟待解决的问题。

**关键词:** 磁约束核聚变; 托卡马克; 等离子体与壁相互作用

## Research Progress on Plasma-Wall Interactions in a Magnetic Confinement Tokamak

LÜ Guanghong<sup>1</sup>, LUO Guangnan<sup>2</sup>, LI Jiangang<sup>2</sup>

(1. Department of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Fusion energy is a potential clean and safe energy resource, and its realization will play a key role on the energy resource requirement in China. At present, the magnetic confinement Tokamak is considered as the most promising method to realize the controlled thermonuclear fusion. However, two bottleneck problems exist for Tokamak. One is how to produce the high-parameter steady-state plasma, and the other is how to choose the key materials in Tokamak as well as the future reactor. Understanding of process and mechanism for Plasma Wall Interaction (PWI) is generally thought as a necessary way to solve the material problem. PWI is also regarded as one of the key issues for the success of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), because it directly determines safety of the ITER operation, R&D process of wall materials, and the life cycle of future wall in ITER. In this paper, we review the recent progress in PWI, and further elucidate its development and the key problems we have to face in the future.

**Key words:** magnetic confinement nuclear fusion; tokamak; plasma-wall interaction

### 1 前言

随着化石能源的枯竭, 人类面临着严重的能源危机。核聚变是潜在的清洁安全能源, 其燃料氘大量存

在于海水之中, 几乎取之不尽用之不竭。因此, 核聚变能被认为是人类能源问题的终极解决方式。核聚变能的最终实现对中国能源问题的解决尤其重要。因为库仑排斥作用使核聚变反应非常困难, 使用强磁场约束等离子体并加热至极端高温的“托卡马克”方式是目前最有可能实现受控热核聚变的方法, 而可能实现长脉冲(稳态)高参数运行的全超导磁约束托卡马克则是目前最有发展前途的热核聚变装置。目前, 在国际上两个大型磁约束聚变装置 TFTR 和 JET 中, 人类已成功实现了 10 MW 级聚变能输出。2006 年 11 月, 欧盟、美国、俄

收稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国际热核聚变实验堆计划(ITER)专项资助项目(2009GB106000); 国家自然科学基金资助项目(50871009)

通信作者: 吕广宏, 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师

罗斯、日本、韩国、印度和中国七方在巴黎正式签署协议,启动全超导磁约束国际热核实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)建设<sup>[1]</sup>,项目耗资120亿美元,将于2018年在法国Cadarache建成,预计可以产生500 MW的能量。ITER计划是目前世界上仅次于国际空间站的又一项国际大科学工程项目,是人类开发洁净新能源的一次大胆尝试。这一计划将集成当今国际上受控磁约束核聚变的主要科学和技术成果,是人类受控核聚变研究走向实用的关键一步。ITER计划是中国有史以来参加的规模最大的国际科技合作项目。

在国内,中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所(以下简称等离子体所)在20世纪90年代,建成了HT-7超导托卡马克,是世界上少数几个超导装置之一。2006年,等离子体所又独立建成了世界上第一个具有非圆截面的全超导托卡马克(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)<sup>[2]</sup>,是当今世界上最先进的磁约束热核聚变研究装置之一。目前,EAST正在开展与ITER相关的各项工程和物理研究,如长脉冲(稳态)等离子体的稳定控制、等离子体驱动和加热、偏滤器物理、先进壁材料和部件研发及其与托卡马克等离子体相互作用等。核工业西南物理研究院(以下简称西物院)是国内最早开展核聚变研究的研究单位,在高温等离子体物理研究方面取得了令人瞩目的成绩。最近其建成的HL-2A装置已经成功地进行了偏滤器位形放电并获得了高约束等离子体。目前,西物院正在全面展开对HL-2A的升级改造工作。

磁约束托卡马克是目前最有可能实现受控热核聚变的方法。磁约束聚变能的实现面临两大瓶颈问题:高参数稳态等离子体物理问题和托卡马克装置及未来反应堆关键材料问题。其中,关键材料问题的解决在很大程度上取决于我们对等离子体与壁材料相互作用(Plasma-Wall Interactions, PWI)过程和机理的深入理解。PWI现象主要发生在托卡马克磁场最外封闭磁面(Last Closed Flux Surface, LCFS)以外的边界等离子体(又称为刮削层, Scraped-Off Layer, SOL)和直接接触SOL的面对等离子体材料(Plasma-Facing Materials, PFM)区域内。因此,弄清SOL中的各种物理过程和机理并施以有效的控制,是未来在ITER上实现高参数、长脉冲运行的重要环节之一。在SOL区,大量来自芯部等离子体的稳态能流和粒子流经过复杂的SOL层流输运到PFM上。同时,由于边界局域模和湍流的作用以及其它不稳定性因素(如垂直位移和破裂等),会把更强的瞬态能流和粒子流投向PFM。这些稳态和瞬态的高热负荷和强粒子流轰

击以及之后的氢/氦(H/He)的扩散和滞留,加上高能聚变中子辐照,不仅损伤PFM、影响PFM的结构和性能、缩短其使用寿命和带来装置安全问题,而且产生的杂质和灰尘进入边界甚至芯部等离子体,降低了等离子体品质并增加了等离子体稳定控制的难度。而灰尘的化学活性、活化放射性和放射性氙滞留等因素则带来了一系列的安全问题。高速灰尘对PFM尤其是诊断用第一镜的损伤也将成为一个严重问题。

ITER下属的国际托卡马克物理活动组织(ITPA)的刮削层/偏滤器(SOL/Div)工作组专门负责甄别ITER最关心的PWI问题并协调国际范围的联合攻关。2008年底,ITER国际组和SOL/Div工作组联合提出了ITER的PWI/边界物理紧急研究计划。PWI问题直接决定了ITER的装置运行安全性、壁材料部件研发进程和未来壁的使用寿命。研究结果对未来聚变示范电站(DEMO)和商业堆的设计、制造和运行将产生重要影响。本文对PWI国内外研究情况进行了详细的总结和评述。

## 2 面对等离子体材料的选择和国内外研究现状

### 2.1 面对等离子体材料的选择

PWI主要发生在SOL等离子体和PFM组成的区域内,直接作用于PFM表面并通过表面进入基体。因此,PFM的选材对于PWI的具体过程有决定性的影响。目前尚无任何PFM可以同时满足与等离子体相容性好、耐高热负荷、耐高通量低能离子和中性粒子辐照、耐高通量高能中子辐照等<sup>[3-4]</sup>苛刻要求。迄今研究最多的PFM是碳(C)、铍(Be)和钨(W)。C的优点是低Z、热力学性能好、不熔化、升华温度高;缺点是高的溅射刻蚀率、与氙共堆积滞留、中子辐照脆化等。Be的优点是低Z、吸氧能力强、H同位素(包括氘和氚,以下如无特殊说明均用H表示)滞留较小;缺点是低熔点、高溅射和毒性等。W材料以其高熔点、低溅射、不与H发生化学反应、H滞留极低等特性被视为未来托卡马克/聚变堆中最可能全面使用的PFM<sup>[5]</sup>,其缺点是存在高Z杂质辐射、高热负荷下再结晶脆化甚至熔化/蒸发的问题。鉴于W在未来壁材料中的重要地位,针对其最主要的辐射问题,德国在ASDEX-U托卡马克上开展了系统的W壁物理实验,结果表明,W杂质向芯部等离子体的传输过程受到多种辅助加热手段的有效抑制<sup>[5]</sup>。据此ITER已确定了一条从Be/C/W到Be/W最后变成全W-PFM的路线<sup>[3,6]</sup>。EAST也确定了约3年后逐步从现在的全C到C/W的过渡,最后变成全W-PFM的发展方向。EAST将成为ITER建成之前世界上能够开

展 ITER 相关的 PWI 物理和工程研究的最重要装置之一。在 ITER 以后的堆型设计中,全 W-PFM 概念已经成为共识<sup>[4]</sup>。

## 2.2 国外研究现状

(1) **边界等离子体的基本物理过程** 边界等离子体的基本物理过程主要包括燃料粒子、PFM 杂质和注入杂质的基本原子分子过程, SOL 层流及杂质输运,以及 PFM 溅射刻蚀和迁移再沉积等,这些都是当今聚变界热门的研究领域。其中,主要原子过程的相关研究包括电子与 H 和杂质离子(原子)的碰撞激发、碰撞电离;电子和杂质离子碰撞激发的自电离、双电子共振复合过程;电子与 H 和  $C_xH_y$  分子、轻元素的氢化合物如 BeH 和 BH 的碰撞激发、电离、解离、激发解离和电离解离,以及离子与中性原子和分子电荷交换碰撞过程等。其中,  $C_xH_y$  分子、轻元素氢化合物分子以及它们的离子与电子的碰撞解离激发、解离电离几乎没有实验数据<sup>[7]</sup>,而电子与处于激发态的杂质原子、离子的碰撞电离数据也极其缺乏<sup>[8]</sup>。W 作为极有潜力的候选壁材料,其中性原子及 1~6 价电离的能级和光谱数据有比较详细的研究, 27~73 价 W 离子的能级和光谱数据,结合实验和理论计算也有比较详细的研究,但是从 7~26 价的 W 离子,没有相关的能级及光谱数据存在,尚为空白<sup>[9]</sup>。经常用于等离子体边界冷却的中 Z 惰性气体元素的各电离态光谱及能级数据状况也不乐观。比如 Ar, 其中性原子和 1, 2 价离子的数据比较全面,但是更高一些电离态的数据显得相当零碎。

SOL 层流涉及边界输运、杂质输运与屏蔽以及 PFM 刻蚀等一系列问题。对其行为及其驱动机制的理论和模拟研究将有助于分析 ITER 等装置中等离子体参量如粒子和能流在第一壁和内外偏滤器区域的分布,了解杂质在 SOL 区的流动与沉积(材料迁徙过程),以及控制芯部等离子体的杂质水平。目前,已经提出了一些驱动 SOL 层流的机制,但是还无法定量模拟实验中所观测到的强大边界粒子流<sup>[10-11]</sup>。另外,国际上对于与上述大型边界等离子体模拟衔接,以其等离子体分布计算结果为背景环境的 SOL/PFM 局域溅射刻蚀、离化输运和再沉积过程的模拟研究也已经结合实验开展多年,并取得了一定进展,如应用开发中的 EDDY 和 ERO 程序。这些模拟研究充分考虑到燃料、灰分、杂质在 PFM 表面和 SOL 等离子体中的复杂的物理化学和分子原子过程,如吸附扩散、物理溅射、化学刻蚀、脱附释放、分解离化、SOL 输运等,成功地解释了一些托卡马克实验现象<sup>[12]</sup>。

(2) **等离子体辐照下表面损伤和结构效应** 来自芯部等离子体的稳态能流和粒子流经过复杂的 SOL 层流输运到

PFM 上,主要是输运到偏滤器的靶板上。偏滤器是专门设计的用于承受托卡马克当中最强大的稳态热和粒子流的特殊面对等离子体部件(Plasma-Facing Components, PFC)。研究表明<sup>[3-6]</sup>: ITER 偏滤器靶板区域要承受高达  $10 \sim 20 \text{ MW/m}^2$  和  $10^{22} \sim 10^{24} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$  的热和  $< 100 \text{ eV}$  的低能离子流; ITER 第一壁(除偏滤器以外的 PFC 部分)所承受的来自 SOL 区域的电荷交换(CX)中性粒子的通量和能量分别估计为  $10^{20} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$  量级和  $100 \sim 500 \text{ eV}$ ;从芯部等离子体中逃逸的高能 CX 中性原子撞击到第一壁上,这些粒子的通量和能量达到  $10^{18} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$  和  $10 \text{ keV}$  的数量级。虽然这些中性原子的通量远远低于偏滤器离子流,但是仍然可以引起第一壁材料的溅射和损伤。同时,由于边界局域模和湍流的作用以及其它不稳定性因素(如垂直位移和破裂等),会把更强的瞬态能流和粒子流经由 SOL 投向 PFM(如破裂时  $\text{GW/m}^2$  量级的毫秒长能流)<sup>[13]</sup>。这些稳态和瞬态的高热负荷和强粒子流轰击以及之后的 H/He 的扩散和滞留,加上中子( $10^{18} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ )辐照效应,不仅损伤 PFM、缩短其使用寿命和带来装置安全问题,而且产生杂质和灰尘进入边界甚至芯部等离子体,降低了等离子体品质并增加了等离子体稳定控制的难度<sup>[14]</sup>。

在以上辐照效应中,偏滤器部分 PFM 受到的影响最大,巨大的 H/He 通量不仅溅射刻蚀表面原子,而且大量进入基体的 H/He 对结构也产生重大影响。例如,对于 W 材料,使其发生了捕获聚集、长大起泡甚至形成表面纳米丝状结构<sup>[15-16]</sup>,降低了 PFM 表面热导率,增大了表面熔化蒸发的可能性。对于第一壁, CX 中性原子轰击对壁造成一定损伤并产生溅射杂质,且由于第一壁离芯部更近,可能造成芯部污染。瞬态强流主要造成表面熔化蒸发,产生杂质和灰尘<sup>[14]</sup>。而中子辐照是一种累积效应,在 PFM 中造成损伤缺陷。对于 ITER 运行前期和 EAST 装置而言,中子辐照效应极低,可以忽略不计。另外,由于具有较大的质量和多重电离带来的鞘层加速倍增效应,导致等离子体中的杂质粒子造成比 H 更严重的 PFM 损伤和后果。

国际上对等离子体辐照效应的实验研究主要集中在实验室以中低束流( $< 10^{20} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ )中高能( $\geq 100 \text{ eV}$ )离子束,或高束流( $> 10^{22} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ )低能( $< 100 \text{ eV}$ )等离子体束照射 PFM<sup>[17-23]</sup>,尤多以后者来模拟 ITER 的偏滤器等等离子体环境。到目前为止,实验研究尚不能清楚解释在入射离子能量不足以在材料中直接产生缺陷的条件下, W 中新缺陷的产生和演变过程,比如氦粒子入射能量小于  $209 \text{ eV}$  时。该过程很难在实验中直接观察,尤其是在初始阶段。计算模拟是这方面研究的一个很好

的方法。国际上这方面的工作尚处于起步阶段。

(3) **杂质与灰尘** 杂质来源于受到等离子体辐照的表面及浅层范围内,热脱附、溅射刻蚀、熔化蒸发等过程都是产生杂质的可能原因<sup>[24-25]</sup>。托卡马克等离子体中的杂质和灰尘,尤其是高 $Z$ 元素杂质或灰尘,将造成强烈的辐射能量损失,降低芯部等离子体的温度,增加等离子体稳定控制的难度<sup>[26-29]</sup>。灰尘是大颗粒的杂质,由杂质原子聚集,熔化液滴,及杂质输运、再沉积、剥落等过程产生。虽然在现有的装置中因为量小而没有引起关注,但是灰尘滞留已经被认为是与ITER装置安全和运行直接相关的问题,成为当前PWI研究中的一个热点。其化学活性、活化放射性和放射性氚滞留等因素带来了一系列的安全问题,如漏水和漏气事故情况下的反应爆炸和放射性灰尘污染。最近还观察到灰尘颗粒进入芯部导致放电终止。目前,国际上对灰尘的研究工作刚刚起步,研究内容主要包括:灰尘产生的可能机理<sup>[14]</sup>;灰尘的监测和收集及后续分析<sup>[30-31]</sup>;灰尘的去除方法<sup>[32]</sup>;相关的模拟方法<sup>[30]</sup>等。

目前,灰尘的研究数据大部分来源于灰尘收集和对这些灰尘的分析以及相关的监测<sup>[30-32]</sup>。这些灰尘的尺寸范围从nm到 $\mu\text{m}$ 量级,形状非常不规则,增加了实验处理的难度。目前灰尘的监测方法有:光散射或者光湮灭,其可提供尺寸和密度信息但是不能够给出和安全相关的量化数据;静电光栅等能够提供灰尘沉积的局域测量。到目前为止,还无法从局域测量得出全局的灰尘存量,因此上述技术都还不能用作灰尘的量化监测。

(4) **壁调整处理** 壁调整处理(Wall Conditioning)是优化等离子体与壁材料相互作用的重要手段之一,它可以改变第一壁材料的表面性质,降低氧及其他杂质含量,控制氢同位素滞留,对于等离子体运行有极大影响。在国际上,当前唯一全钨壁的托卡马克装置ASDEX-U对一系列常规壁处理手段进行了尝试,并取得了有一定参考价值的结果。包括辉光放电清洗引起的He滞留对放电的影响、氘/氦离子回旋共振清洗的效果、硼化和硅化的使用及其沉积层的寿命、碳钨共存条件下碳的沉积与氧化移除等<sup>[33-37]</sup>。在全钨壁托卡马克装置 Alcator C-Mod 上,硼化的作用被重点研究。实验结果表明,硼化对芯部等离子体能量、点火阶段等离子体参数、氚滞留量、氢氦比都有极大影响<sup>[38-39]</sup>。由于这两个装置都是短脉冲放电,而ASDEX-U的W为CFC上的微米量级薄膜层,其研究结果对ITER和EAST的适用性有待进一步研究。

鉴于硼化在全金属第一壁条件下对放电效果的影响,国外已开始研发实时硼化(Real Time Boronization)

技术。目前实时硼化主要有2类方法:放电时充入硼烷和利用等离子体轰击固态含硼材料。日本在CHS和LHD装置上研究了不同位置充硼烷气体对杂质、氚循环的影响<sup>[40]</sup>。含硼石墨在聚变装置中的表现也被广泛的研究<sup>[40]</sup>,但石墨由于其强烈的化学溅射和氚滞留已被认为不适合作为未来聚变材料。美国GA公司最近提出硼钨混合材料的概念并进行了试制,近期将在DIII-D装置上进行测试工作<sup>[41]</sup>。在壁清洗方面,国际上还有一些新方法正处于研发阶段。例如,在离子回旋共振清洗及辉光放电清洗过程中以氮气或氦气代替氧作为工作气体除去C沉积层<sup>[42-43]</sup>,激光法清除沉积层<sup>[44]</sup>等。这些方法只在少量装置上进行过实验,结果并不具代表性,其实际作用仍须更深入和广泛的研究。

(5) **壁状态原位监测** 在稳态和瞬态的高热负荷和强粒子流轰击下,PFM表面形貌、成分以及H/He滞留发生实时变化。要实现托卡马克高参数、长脉冲运行势必面临许多安全和运行的限制,需要通过对PFM的全面原位监测和控制来实现。描述等离子体和壁相互作用的新型先进诊断手段已处在实验室研究阶段,有些正被目前的托卡马克装置所验证,可作为ITER等大型装置的参考<sup>[45]</sup>。目前,用于研究材料刻蚀、迁移、再沉积机制的新颖手段主要基于原位和高时间分辨率的方法<sup>[46]</sup>。材料表面刻蚀形貌的检测对于PWI研究和控制意义重大,实验仪器主要有散斑干涉仪(Speckle Interferometry),目前还需要进一步完善并在托卡马克装置上验证。对于共沉积层化学成分变化和H滞留含量的原位监测主要是通过激光诱导击穿光谱(Laser Induced Breakdown Spectroscopy)实现的,这项技术是基于物质等离子体发光来探测物质成分的分析方法。利用此方法在实验室内对Tore Supra和TEXTOR的沉积层做了首例相关分析,H、C及杂质的谱线清楚的得到表征,表明此诊断手段在分析再沉积层和壁处理效果很有潜力,但目前还没获得定量的测量结果。

## 2.3 国内研究现状

2006年,中科院等离子体物理研究所主办了两年一次的PWI方面最重要的国际会议“The 17th International Conference on Plasma-Surface Interactions in Controlled Fusion Devices”。2008年,北京航空航天大学主办了固体辐照效应计算机模拟方面的国际会议“The 9th International Conference on Computational Simulation of Radiation Effect in Solids”。两次会议均首次在中国召开,表明了中国在这两个领域的研究取得了长足进展,也有力地推动了我国PWI及相关研究工作的进一步展开。但是,我国在PWI方面的研究仅集中在少数几个研究所和大

学中,缺乏组织性和深入的基础研究。

无论是从实验还是理论上,国内对 PWI 的研究起步都比较晚。实验上,等离子所 EAST 装置在 SOL 区已安装 5 个可以测量 SOL 层流的马赫探针,同时开始对相关驱动机制展开模拟研究<sup>[47-48]</sup>。而国内对 SOL 环境下的材料刻蚀、杂质输运以及再沉积等问题相关的理论和模拟研究工作开展较少。大连理工大学开发了一个能够描述多物理化学场耦合、多空间尺度(主等离子体区、壁表面的鞘层区)变化的混合理论模型,并自主研制出相应的二维模拟程序,如流体力学模拟程序、PIC/Monte-Carlo 模拟程序及混合模拟程序。东华大学应用 B2 和 B2.5(SOLPS5.0 中主要模拟程序)对托卡马克边界等离子体进行了模拟,并对托卡马克边界层和偏滤器进行了较深入的研究,掌握了 SOLPS5.0 核心模拟技术,最近和国际同行合作对 ITER 托卡马克启动时边界等离子体和杂质输运做了初步地三维数值模拟研究。四川大学提出的带电粒子输运双群模型已用于离子在表面的反射和溅射系数的计算,并向中国原子分子数据联合体和国际原子能机构提供了有价值的计算数据。

在托卡马克原子分子过程研究方面,2005 年建成的上海复旦大学电子束离子阱(EBIT-Electron Beam Ion Trap)装置是一种很好的研究手段<sup>[49]</sup>。目前已经研究了许多对等离子体研究非常有价值的物理过程。复旦大学现代物理所还开发了全信息带电粒子动量谱仪技术,用于低能电子与原子分子相互作用实验中散射电子、自由电子、及反冲离子的多重复合测量,获得各个反应产物的末态动量,再现反应过程。EBIT 装置电子能量正在向低能端扩展,同时在建低能 EBIT 装置(电子能量低至 50 eV),可用于研究等离子体对壁材料的腐蚀。

聚变等离子体环境下,在 H 或 He 引起的钨基 PFM 起泡以及表面形貌奇异变化研究方面,由于高束流低能量的离子束/等离子体束设备的缺乏,国内实验室难以做到  $10^{25}/\text{m}^2$  以上的照射通量,还没有独立开展高通量辐照下 W 材料的实验室研究工作的报道。对等离子体作用下聚变材料的计算模拟工作也刚刚展开,而在托卡马克上使用 W 的研究工作还处于起步阶段。北京科技大学以及西物院开展了 W/Cu 复合材料小样品制备的研究<sup>[50]</sup>,工作主要集中在粉末冶金功能梯度材料方面;西物院与日本方面合作,开展了一些电子束照射的高热负荷影响下的 W 材料性能研究;等离子体所已经开展了在 HT-7 超导托卡马克中放入 W 材料小样品的探索性研究,并正在为 EAST 研究开发大面积、毫米量级厚 W 涂层 Cu 基面对等离子体部件,还展开了相关材料 R&D 和等离子体与壁相互作用方面的研究工作<sup>[51-52]</sup>。

近年来,北京航空航天大学开展了较多的计算模拟工作<sup>[53-59]</sup>,研究包括 H/He 在 W 单晶的行为、W 晶界中 H/He 的作用、杂质 C 和 O 的效应等,取得了较多成果。在 H 与 W 的相互作用方面,提出了 H 在 W 中起泡的微观物理机制,即只要通过空位或空位型缺陷提供足够大的空间进而提供一个合适的电子密度, H 便可以克服较低的能垒扩散进入这些空间,饱和内表面后形成  $\text{H}_2$  分子<sup>[57]</sup>。这些  $\text{H}_2$  分子将是氢泡的初步成核。这个机制可以推广到其它轻元素如 C、O 等,也可以类推到其它金属和合金的情况。

国内的灰尘研究开展的很少,断断续续进行过静电光栅拦截灰尘的初步试验。最近, EAST 刚刚开始进行扫灰尘和数灰尘的基础工作。

等离子体所和西物院多年来在各自的装置上开展了石墨壁条件下的常规壁处理的研究和日常工作,包括了内部部件烘烤、PFM 表面辉光放电清洗、离子/电子回旋共振放电清洗、可控破裂放电清洗、硼化、锂化、硅化、C 沉积层的氧化移除等<sup>[60-61]</sup>,积累了丰富的壁处理技术和经验。等离子体所规划在 3~5 年内对 EAST 的壁材料进行升级,高 Z 的钨材料将逐步替换当前使用的石墨材料。目前,部分和全 W-PFM 条件下的壁处理技术的研究必须得到足够的重视。而国内对壁的原位监测技术研究很少,急需展开。

### 3 展 望

尽管国内外对 PWI 问题已经做了不少研究工作,但是从大的方面来说,仍然存在许多问题需要解决。根据当前的研究进展和现状可以看出, PWI 还存在如下问题亟待解决:

(1) 边界等离子体的原子分子过程数据尚不完善,粒子输运和再沉积的行为并不完全清楚;

(2) 等离子体辐照下 PFM 的表面损伤、杂质产生和结构效应问题,这些与 PFM 的寿命直接相关,强磁场、热冲击条件下 PFM 的行为也有待进一步研究。

(3) 灰尘产生的机理及安全分析,灰尘对材料的损伤程度,灰尘监测和清除问题;

(4) 尽管在全金属壁调整处理方面国际上有一些新方法正处于研发阶段,但是这些方法只进行过少量实验,其实际应用有待进行更深入和广泛的研究。

(5) 托卡马克高参数长脉冲运行面临许多安全和运行的限制,需要通过对壁状态的全面原位监测和控制来达成,因此发展壁监测技术迫在眉睫。

针对国家聚变大科学工程和 ITER 对 PWI 相关数据的紧迫需求,国内外必须尽快全面深入开展 PWI 相关

的基础研究工作。国家科技部 2009 年国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划专项已对 PWI 研究进行资助, 即“托卡马克等离子体与壁材料相互作用研究”项目, 这将极大地促进中国 PWI 研究的进展。

## 参考文献 References

- [1] ITER International Organization. ITER[EB/OL]. (2006-11-21)[2009-10-21]. <http://www.iter.org>.
- [2] EAST Big Science Engineering. EAST Experimental Device Smoothly Passed Acceptance Inspection[EB/OL]. (2006-08-11)[2009-10-21]. <http://east.ipp.ac.cn>.
- [3] Shimada M, Costley A E, Federici G, *et al.* Overview of Goals and Performance of ITER and Strategy for Plasma-Wall Interaction Investigation[J]. *Nucl Mater*, 2005, 337: 808-815.
- [4] Bolt H, Barabash V, Krauss W, *et al.* Materials for Plasma-Facing Components of Fusion Reactors[J]. *Nucl Mater*, 2005, 329-333: 67-73.
- [5] Neu R, *et al.* 20<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference[C]. Vilamoura: Portugal, 2004.
- [6] Bolt H, Barabash V, Federici G, *et al.* Plasma Facing and High Flux Materials-Needs for ITER and Beyond[J]. *Nucl Mater*, 2002, 307-311: 43-52.
- [7] Janev R K. Atomic and Molecular Physics Issues in Current Thermonuclear Fusion Research[J]. *Contemporary Physics*, 2005, 46: 121-140.
- [8] West W P, Goldsmith B, Evans T E, *et al.* Atomic Physics Processes Important to the Understanding of the Scrap-off Layer of Tokamaks[J]. *General Atomic Report*, 2002: GA-A23 960.
- [9] Kramida A E, Shirai T. Energy Levels and Spectral Lines of Tungsten, W III through WLXXIV[J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 2009, 95: 305-474.
- [10] Asakura N. Understanding the SOL Flow in L-Mode Plasma on Divertor Tokamaks, and Its Influence on the Plasma Transport[J]. *Nucl Mater*, 2007: 363-365: 41-51.
- [11] Chankin A V, Coster D P, Asakura N, *et al.* Discrepancy between Modeled and Measured Radial Electric Fields in the Scrape-off Layer of Divertor Tokamaks: a Challenge for 2D Fluid Codes[J]. *Nucl Fusion*, 2007, 47: 762.
- [12] Ohya K, Inai K, Tanabe T, *et al.* Modeling of Asymmetric Redeposition Distribution between Inner and Outer Regions of the W-Shaped Divertor in JT-60U[J]. *Nucl Mater*, 2007, 363-365: 78-85.
- [13] Loarte A, *et al.* Power and Particle Control[J]. *Nucl Fus*, 2007, 47: 5 203-5 263.
- [14] Joachim Roth, Tsitrone E, Loarte A, *et al.* Recent Analysis of Key Plasma Wall Interactions Issues for ITER[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390-391: 9.
- [15] Yoshida N, Iwakiri H, Tokunaga K, *et al.* Impact of Low Energy Helium Irradiation on Plasma Facing Metals[J]. *Nucl Mater*, 2005, 337-339: 946-950.
- [16] Alimov V K, Roth J. Hydrogen Isotope Retention in Plasma-Facing Materials: Review of Recent Experimental Results[J]. *Phys Scr*, 2007, T128: 6-13.
- [17] Luo G N, Shu W M, Nishi M. Influence of Blistering on Retention in W Irradiated by High Flux Deuterium 10-100 eV Plasmas[J]. *Fusion Engineering and Design Fusion Eng Design*, 2006, 81: 957-962.
- [18] Ueda Y, Funabiki T, Shimada T, *et al.* Hydrogen Blister Formation and Cracking Behavior for Various Tungsten Materials[J]. *Nucl Mater*, 2005, 337-339: 1 010-1 014.
- [19] Bizyukov I, Krieger K, Azarenkov N, *et al.* Formation of D Inventories and Structural Modifications by Deuterium Bombardment of Tungsten Thin Films[J]. *Nucl Mater*, 2005, 337-339: 965-969.
- [20] Venhaus T, Causey R, Doerner R, *et al.* Behavior of Tungsten Exposed to High Fluencies of Low Energy Hydrogen Isotopes[J]. *Nucl Mater*, 2001, 290-293: 505.
- [21] Luo G N, Shu W M, Nishi M. Incident Energy Dependence of Blistering at Tungsten Irradiated by Low Energy High Flux Deuterium Plasma Beams[J]. *Nucl Mater*, 2005, 347: 111-117.
- [22] Tokunaga K, Baldwin M J, Doerner R P, *et al.* Blister Formation and Deuterium Retention on Tungsten Exposed to Low Energy and High Flux Deuterium Plasma[J]. *Nucl Mater*, 2005, 337-339: 887-891.
- [23] Nishijima D, Ye M Y, Ohno N, *et al.* Formation Mechanism of Bubbles and Holes on Tungsten Surface with Low-Energy and High-Flux Helium Plasma Irradiation on NAGDIS-II[J]. *Nucl Mater*, 2004, 329-333: 1 029-1 033.
- [24] Bazylev B N, Janeschitz G, Landman I S, *et al.* Melt Damage Simulation of W-Macrobush and Divertor Gaps after Multiple Transient Events in ITER[J]. *Nucl Mater*, 2007, 363-365: 1 011-1 015.
- [25] Bazylev B, Janeschitz G, Landman I, *et al.* Erosion Simulation of First Wall Beryllium Armour under ITER Transient Heat Loads[J]. *Nucl Mater*, 2009, 386-388: 919-921.
- [26] Krstic P S, Reinhold C O, Stuart S J. Plasma-Surface Interactions of Hydrogenated Carbon[J]. *Nucl Instr and Meth B*, 2009, 267: 704-710.
- [27] Behrisch R, Eckstein W. *Sputtering by Particle Bombardment* [M]. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [28] Roth J, Preuss R, Bohmeyer W, *et al.* Flux Dependence of Carbon Chemical Erosion by Deuterium Ions[J]. *Nucl Fus*, 2004, 44: 121.
- [29] Doerner R, *et al.* Private Communication, 2007.
- [30] Krasheninnikov S I, Pigarov A Yu, Smirnov R D, *et al.* Recent Progress in Understanding the Behavior of Dust in Fusion Devices[J]. *Plasma Phys Control Fusion*, 2008, 50: 124 054.
- [31] Gauthier E. Progress in Diagnostics for Characterization of Plas-

- ma-Wall Interaction in Tokamaks[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 1 059 – 1 065.
- [32] Rosanvallon S, Grisolia C, Andrew P, *et al.* Dust Limit Management Strategy in Tokamaks[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 57 – 60.
- [33] Mayer M, Rohde V, Sugiyama K, *et al.* Carbon Balance and Deuterium Inventory from a Carbon Dominated to a Full Tungsten ASDEX Upgrade[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 538 – 543.
- [34] Bobkov VI, Braun F, Dux R, *et al.* Operation of ICRF Antennas in a Full Tungsten Environment in ASDEX Upgrade[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 900 – 903.
- [35] Rohde V, Dux R, Kallenbach A, *et al.* Wall Conditioning in ASDEX Upgrade[J]. *Nucl Mater*, 2007, 363 – 365: 1 369 – 1 374.
- [36] Lyssoivan A, Koch R, Eester D Van, *et al.* New Scenarios of ICRF Wall Conditioning in TEXTOR and ASDEX Upgrade[J]. *Nucl Mater*, 2007, 363 – 365: 1 358 – 1 363.
- [37] Hopf C, Jacob W, Rohde V. Oxygen Glow Discharge Cleaning in Nuclear Fusion Devices[J]. *Nucl Mater*, 2008, 374: 413 – 421.
- [38] Lin Y, Irby J, Lipschultz B, *et al.* Hydrogen Control in Alcator C-Mod Walls and Plasmas[J]. *Nucl Mater*, 2007, 363 – 365: 920 – 924.
- [39] Lipschultz B, Lin Y, Marmor E S, *et al.* Influence of Boronization on Operation with High-Z Plasma Facing Components in Alcator C-Mod[J]. *Nucl Mater*, 2007, 363 – 365: 1 110 – 1 118.
- [40] Sagara A, Hasegawa Y, Suzuki K, *et al.* Real Time Boronization Experiments in CHS and Scaling for LHD[J]. *Nucl Mater*, 1997, 241 – 243L: 972 – 976.
- [41] Wong C P C. Innovative Tokamak DEMO First Wall and Divertor Material Concepts[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 1 026 – 1 028.
- [42] Ferreira J A, Tabarés F L, Tafalla D. Optimization of Non-Oxidative Carbon-Removal Techniques by Nitrogen-Containing Plasmas[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 593 – 596.
- [43] Sundelin P, Schulz C, Philipps V, *et al.* Nitrogen-Assisted Removal of Deuterated Carbon Layers[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 647 – 650.
- [44] Gašior P, Irrek F, Petersson P, *et al.* Laser-Induced Removal of Co-Deposits from Graphitic Plasma-Facing Components: Characterization of Irradiated Surfaces and Dust Particles[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 585 – 588.
- [45] Ikeda K. Progress in the ITER Physics Basis[J]. *Nucl Fus*, 2007, 47: 27.
- [46] Gauthier E. Progress in Diagnostics for Characterization of Plasma-Wall Interaction in Tokamaks[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 1 059 – 1 065.
- [47] Ou J, Zhu S. Numerical Predictions of the Poloidal  $E \times B$  Drift in EAST[J]. *Nucl Mater*, 2007, 363 – 365: 633 – 637.
- [48] Ou J, Zhu S. Investigation of the Parallel Flow in the Edge Plasma of EAST [J]. *Plasma Science & Technology*, 2007, 9: 417.
- [49] Zhu X F, Liu Y, Wang X C, *et al.* Status of the Shanghai EBIT[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2005, 235: 509 – 513.
- [50] Ge C C, Li J T, Zhou Z J, *et al.* Development of Functionally Graded Plasma-Facing Materials[J]. *Nucl Mater*, 2000, 283 – 287: 1 116 – 1 120.
- [51] Luo G N, Zhang X D, Yao D M, *et al.* Overview of Plasma-Facing Materials and Components for EAST [J]. *Phys Scr*, 2007, T128: 1.
- [52] Luo G N, Liu M, Kuang Z Q, *et al.* Directly-Cooled VPS-W/Cu Limiter and Its Preliminary Results in HT-7[J]. *Nucl Mater*, 2007, 363 – 365: 1 241 – 1 245.
- [53] Liu Y L, Zhou H B, Lü G H, *et al.* Effect of He on the Structure and Bonding Properties of W: A First-Principles Computational Tensile Test [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2009, 267: 3 193 – 3 196.
- [54] Liu Y L, Zhou H B, Lu G H, *et al.* The Ideal Tensile Strength and Deformation Behavior of a Tungsten Single Crystal[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2009, 267: 3 282 – 3 285.
- [55] Li X, Gao F, Lü G H. Molecular Dynamics Simulation of Interaction of H with Vacancy in W[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2009, 267: 3 197 – 3 199.
- [56] Liu Y L, Zhang Y, Lu G H, *et al.* Structure Stability and Diffusion of Hydrogen in Tungsten: a First-Principles Study[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 1 032 – 1 034.
- [57] Liu Y L, Zhang Y, Lu G H, *et al.* Vacancy Trapping Mechanism for Hydrogen Bubble Formation in Metal[J]. *Phys Rev B*, 2009, 79: 172 103.
- [58] Zhou H B, Liu Y L, Lü G H, First-Principles Investigation Energetics and Site Preference of He in a W Grain Boundary[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2009, 267: 3 189 – 3 192.
- [59] Alkhamees A, Liu Y L, Lü G H, *et al.* First-Principles Investigation on Dissolution and Diffusion of Oxygen in Tungsten[J]. *Nucl Mater*, 2009, 393: 508 – 512.
- [60] Yu Y W, Gao X, Hu J S, *et al.* ECR Discharge Cleaning and Followed He GDC on HT-7 Tokamak[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 1 051 – 1 054.
- [61] Gao X, Hu J S, Zhao Y P, *et al.* ICRF Wall Conditioning and Plasma Performance on EAST[J]. *Nucl Mater*, 2009, 390 – 391: 864 – 868.